第 37 卷第 11 期 2017 年 6 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.11 Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201604160706
沈国强,郑海峰,雷振锋.SPEI 指数在中国东北地区干旱研究中的适用性分析.生态学报,2017,37(11):3787-3795.
Shen G Q, Zheng H F, Lei Z F.Applicability analysis of SPEI for drought research in Northeast China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(11):3787-3795.

SPEI 指数在中国东北地区干旱研究中的适用性分析

沈国强[1,2],郑海峰[1,*],雷振锋[1,2]
1 中国科学院东北地理与农业生态研究所,长春 130102
2 中国科学院大学,北京 100049

摘要:干旱指数的区域适用性是准确表征区域干旱的重要前提,本文以中国东北地区为典型研究区,探讨标准化降水蒸散指数(SPEI)在该地区应用的有效性。基于研究区 90 个气象台站的逐日气象资料,计算 1961—2014 年多时间尺度的 SPEI 指数。从 Kolmogorov-Smirnov (K-S)拟合优度检验、SPEI 与典型干旱事件核准、SPEI 与农作物受旱灾面积及与土壤湿度相关性分析等方面,验证 SPEI 指数在东北地区的适用性。分析结果表明:1)东北地区多时间尺度的累积水分亏缺量符合 Log-logistic 分布,SPEI 指数在东北地区的应用具备数学统计理论基础;2)生长季平均 SPEI 值与黑龙江省、吉林省和辽宁省农作物受旱灾面积比例均呈极显著负相关($P<0.01$);3)在 1、3、6 和 12 个月尺度下,SPEI 与土壤湿度呈显著正相关($P<0.05$)的站点比例分别为 90.2%、92.16%、90.2%和 88.24%。综上所述,SPEI 指数不仅满足数学理论统计的要求,而且与干旱灾情数据和土壤水分监测值均具有极度的关联性,说明其在东北地区干旱预测和定量化研究中具有较好的适用性。
关键词:标准化降水蒸散指数;K-S 检验;土壤湿度;干旱受灾面积;干旱事件

Applicability analysis of SPEI for drought research in Northeast China

SHEN Guoqiang[1,2], ZHENG Haifeng[1,*], LEI Zhenfeng[1,2]
1 *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130102, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: Determining the applicability of a drought index to a specific area is a prerequisite for drought quantification and mapping on a regional scale. In this paper, we explored the effectiveness of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) in northeast China. SPEI values at a time scale of 1, 3, 6, and 12 months were calculated using a daily climate dataset that had been collected by 90 meteorological stations in northeast China from 1961 to 2014. The climate variables analyzed included daily temperature, precipitation, atmospheric pressure, wind speed, relative humidity, and sunshine duration. The applicability of the SPEI for drought quantification in northeast China was investigated using Kolmogorov-Smirnov (K-S) test, validation analysis from specific drought events and soil moisture, and correlation analyses between SPEI and the statistics of the area suffering from drought.The results showed that our null hypothesis was rejected by the K-S Test at a 0.05 significance level for each station, and that the Log-logistic distribution matched very well to the water surplus or deficit series for all four time scales at each station. The drought-affected areas showed a significant negative relationship to the SPEI during the growing season (April to September) at these four time scales during 1971—2013. The index of SPEI01 was found to be more suitable for predicting the time, location, and intensity of drought events. There was a strong positive correlation between soil moisture at a depth of 20 cm and the SPEI for most of the climate stations (90.2% of stations for SPEI01, 92.16% of stations for SPEI03, 90.2% of stations for SPEI06 and 88.24% of stations for SPEI12).

基金项目:国家自然科学基金项目(41371194);中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-302-03);中国科学院"协同创新团队"项目(DLSXT16001)
收稿日期:2016-04-16; **网络出版日期**:2017-02-22
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhenghaifeng@ iga.ac.cn

In addition, the number of climate stations decreased as the time scale increased. Our results indicate that the SPEI is suitable for quantifying droughts, and therefore, should be widely used in scientific drought prediction research in Northeast China.

Key Words: SPEI; K-S Test; soil moisture; drought-affected area; drought event

干旱指数是定量表征干旱事件的重要指标,常用的干旱指数有降水距平百分率、土壤湿度、蒸发量/降水量、Palmer 干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)和标准化降水指数(Standardized precipitation index, SPI)等[1],其中 PDSI 和 SPI 应用较为广泛。PDSI 指数的优点在于考虑了温度和前期天气条件对干旱的影响,非常适用于干旱对全球变暖响应的研究[2],但其参数获取困难且计算复杂,加之时间尺度固定(9—12 个月之间),因此无法有效地应用于干旱的多时间尺度研究中[3]。SPI 指数虽然适用于多时间尺度研究,但其仅以降水量作为干旱定量的唯一参数,忽略了温度对干旱形成的重要作用[4-5]。标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)[3]不仅充分考虑了气温对干旱的影响,而且综合考虑了干旱的多时间尺度。SPEI 自 2010 年被提出以来,被广泛应用于定量干旱的研究中,例如 SPEI 与气候因子的相互关系研究[6]、不同干旱指数的对比分析[7-8]、区域干旱时空分布特征分析[9]、蒸散量算法差异对 SPEI 的影响[10]以及 SPEI 的多时间尺度研究[11]。鉴于干旱的复杂性、广泛性和时空差异性,干旱指数的区域适用性成为干旱研究的前提,如果不根据区域的实际情况进行计算,而将 SPEI 应用于定量干旱事件,容易导致结论偏差[12]。然而,在相关 SPEI 的研究中,仅有少数学者关注 SPEI 指数的前提和适用性。这些研究大多以年为时间尺度或以单个月份为研究尺度(例如 7 月份和 12 月份)探讨 SPEI 在全球或全国尺度的适用性[13-15],并没有考虑 SPEI 指数的假设和前提。由于区域干旱精确定量化的需求在于—干旱指数要准确反映任一月份、任一站点的水分收支状况,因而,迫切需要以月为时间尺度,验证该指数在区域尺度上所有站点的适用性。

自 20 世纪 90 年代中期以来,东北地区干旱化趋势不断增强[16],生态系统的干旱脆弱性随之加大,农业发展和生态系统平衡面临巨大威胁[17-18]。精确定量东北地区的干旱,对该区的干旱适应性研究与管理具有重要意义。到目前为止,SPEI 指数在定量东北地区干旱方面的有效性和适用性尚不明确。本文将从 SPEI 的理论假设和实际定量验证入手,应用 K-S 检验和相关性分析等方法,探讨(1) SPEI 指数在东北地区的数学统计理论基础;(2)干旱事件、旱灾面积和土壤湿度对 SPEI 指数的验证效果。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

研究区为中国东北地区(38°43′N—53°33′N, 118°50′E—135°2′E)(图 1),行政上包括黑龙江省、吉林省和辽宁省,总面积约 84.53 万 km^2。该区面积广阔,地形以山地和平原为主,其中,东北平原黑土资源丰富,土壤肥沃,是我国重要的粮食基地。该区主要气候类型为温带季风气候,年平均气温为 5.4℃,由南向北依次跨越暖温带、中温带和寒温带;年平均降水量约为 600mm,由东向西逐渐减少,东部为湿润区,西部为半湿润区。研究区干旱频发,尤其是进入 21 世纪之后,干旱事件发生更加频繁、持续时间更长[19],这严重制约东北地区农业生产的发展。据农业部种植业管理司统计,1971—2013 年,东北三省平均每年受旱灾面积达 $4\times10^4 km^2$(占地区播种总面积的 22.4%),其中黑龙江省、吉林省和辽宁省受灾面积分别为 $1.87\times10^4 km^2$、$1.14\times10^4 km^2$ 和 $9.9\times10^3 km^2$,分别占各自农作物播种总面积的 20.1%、24.9%和 25%。

1.2 数据来源

本文所用气象数据来源于中国气象局发布的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),包括研究区 90 个气象站点(黑龙江、吉林和辽宁分别占 31、27 和 32 个)1961 年 1 月 1 日到 2014 年 4 月 30 日的逐日气象要素资料(气温、降水量、气压、风速、相对湿度和日照时数)。这些气象数据经过中国气象局严格地质量控制,数据

的实有率和正确率在 99%以上。

典型干旱事件资料来源于中国气象灾害年鉴。本文整理了 2004—2010 年东北地区影响较大的 8 次干旱事件的时间、范围和强度。

农作物受旱灾面积资料来自农业部种植业管理司灾情数据库(202.127.42.157/moazzys/zaiqing.aspx),本文分析了 1971—2013 年东北各省的农作物播种面积以及受旱灾面积。

土壤湿度数据来源于中国气象数据网(data.cma.cn)发布的中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集,数据的时间范围为 1991—2013 年。为了保证数据的完整性并减少灌溉措施对土壤湿度的影响,文中保留了 51 个非水田站点的土壤湿度(10—20cm 深处)数据,用算数平均法将旬值转为月值。

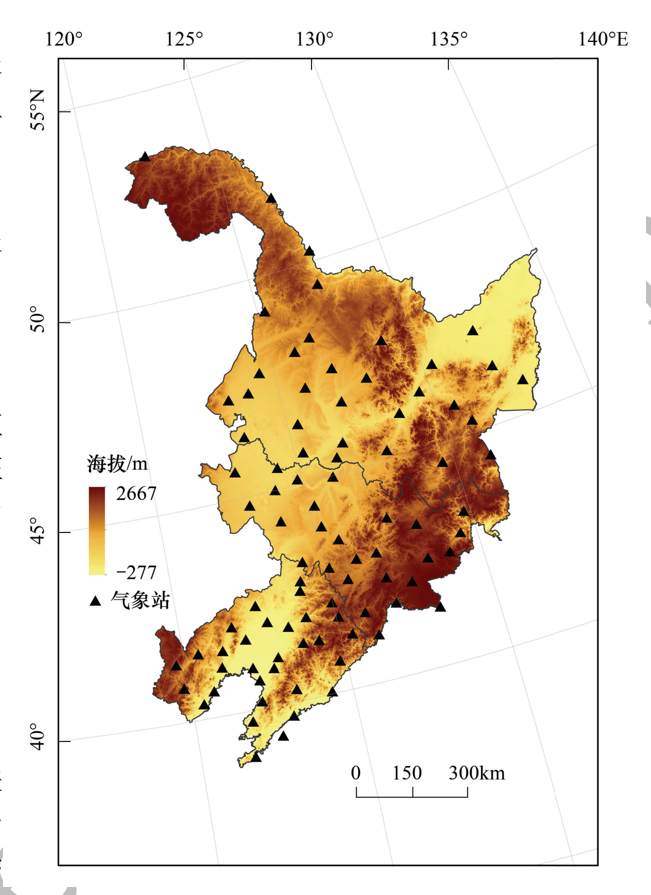


图 1　研究区及气象站

Fig.1　Study area and Meteorological stations

2　研究方法

2.1　SPEI 指数计算

SPEI 以月水分亏缺量(即降水量减去蒸散量)来表示水分的盈余或赤字。基于"历史同月的累积水分亏缺量服从 Log-logistic 分布"这一假设,计算分布概率密度函数和累计概率,然后转化成标准正态分布进而求得[13]。具体计算步骤如下:

第一步计算潜在蒸散量。本文采用 FAO Penman-Monteith 法[20]计算潜在蒸散量,公式如下:

$$\mathrm{PET} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273}\mu_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)}$$

式中,PET 为潜在蒸散量(mm/d), R_n为地表净辐射(MJ m^{-2} d^{-1}),G 为土壤热通量(MJ m^{-2} d^{-1}), T 为日平均气温(℃), Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/℃), γ 为干湿表常数(kPa/℃), μ_2为 2m 高处的风速(m/s), e_s为饱和水汽压(kPa), e_a为实际水汽压(kPa)。

第二步计算逐月降水与蒸散的差值,即水分亏缺量:

$$D_i = P_i - \mathrm{PET}_i$$

式中,D_i为水分亏缺量,P_i为月降水量,PET_i为月潜在蒸散量;并根据线性递减权重[21]方案建立不同时间尺度的累积水分亏缺量序列:

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1}\left[\frac{2(i+1)}{k(k+1)}(P_{n-i} - \mathrm{PET}_{n-i})\right], n \geq k$$

式中,k 为时间尺度(月),n 为计算次数;

第三步采用 Log-logistic 概率密度函数拟合所建立的水分亏缺量序列:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}\left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2}$$

式中,α 为尺度参数,β 为形状参数,γ 为位置参数,可通过线性矩的方法拟合获得。累积概率可通过分布函数计算:

$$F(x) = [1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma}\right)^{\beta}]^{-1}$$

第四步对拟合的水分亏缺量序列进行标准正态分布转换,获得对应的 SPEI:

$$\mathrm{SPEI} = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3}, W = \sqrt{-2\ln(P)}$$

当 $P \leqslant 0.5$ 时,$P = 1 - F(x)$;当 $P > 0.5$ 时,$P = 1 - P$, 同时 SPEI 的符号逆转,式中其他常数项分别为 $C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$。蒸散量和 SPEI 值均在 R 语言 SPEI package 中进行,本文计算了 1、3、6 和 12 个月尺度的 SPEI,分别记为 SPEI01、SPEI03、SPEI06 和 SPEI12。

2.2 K-S 拟合优度检验

K-S 检验[22]是一种拟合优度检验方法,利用样本数据推断样本来自的总体是否与某一理论分布有显著差异。其基本思路是:用 $F(x)$ 表示各样本观测值在理论分布上出现的理论累积概率值,$S(x)$ 表示各样本观测值的实际累计概率值,计算检验统计量:

$$D = \max | S(x) - F(x) |$$

当零假设成立时,D 统计量服从 Kolmogorov 分布,计算对应的概率 p 值,若 p 小于显著性水平 α,则应拒绝零假设,认为样本来自的总体与指定的分布有显著差异;否则,不能拒绝零假设,认为二者无显著差异。为了验证东北地区累积水分亏缺量是否符合 Log-logistic 分布,从而判断 SPEI 在东北地区的应用是否具备数理统计基础,本文对不同时间尺度下的累积水分亏缺量序列与 Log-logistic 分布进行了 K-S 检验。

2.3 相关性分析

为了验证 SPEI 在表征农作物受旱灾方面的适用性,本文分别分析了 1971—2013 年黑龙江省、吉林省和辽宁省生长季(4—9 月)平均 SPEI 值与当年作物受旱灾面积比例的相关性(各省的样本量均为 43a,当 $n = 43$ 时,$r_{\alpha=0.01}$ 的临界值为 0.389)。

同时,为了验证 SPEI 在反映土壤干湿状况方面的适用性,本文以站点为检验单元,分析了土壤湿度与 SPEI 指数的相关性(各站点的样本量均为 134 个月,当 $n = 134$ 时,$r_{\alpha=0.05}$ 的临界值为 0.17,$r_{\alpha=0.01}$ 的临界值为 0.222)。文中相关系数 r 均指 Pearson 简单相关系数。

3 结果分析

3.1 基于 K-S 检验的 SPEI 指数理论验证

累积水分亏缺量序列与 Log-logistic 分布的 K-S 检验结果(图 2)表明,在不同时间尺度下,K-S 检验的概率 p 值均大于显著性水平 $\alpha = 0.05$,没有足够理由拒绝零假设(零假设为累积水分亏缺量样本来自 Log-logistic 分布总体)。因此,可以判定东北地区累积水分亏缺量序列与 Log-logistic 分布无显著差异,即该序列来自 Log-logistic 分布总体。在不同尺度、不同站点和不同月份条件下,Log-logistic 分布函数能均较好地拟合累积水分亏缺量序列,由此表明,基于该分布的 SPEI 指数在东北地区干旱表征上具备数学统计理论基础。

3.2 典型干旱事件对 SPEI 指数的核准分析

典型干旱事件与同期 SPEI 核准的结果(表 1)表明,SPEI 与干旱事件的时间、地点和强度吻合度较高。例如,在气象灾害年鉴中的记录为“2006 年 4—5 月黑龙江齐齐哈尔、大庆和绥化等地旱情严重(中到重度)”,经查,齐齐哈尔、大庆、绥化和海伦 2006 年 5 月的 SPEI 值分别为-1.3,-1,-1.2 和-1.7,达到中度甚至重度干旱,与年鉴记载相符。另据记载,2009 年 6 月 21 日至 11 月上旬,辽宁和吉林出现了大范围的中到重度气象干旱,吉林农作物受旱面积 $2.85 \times 10^4 \mathrm{km}^2$,重旱面积 $1.32 \times 10^4 \mathrm{km}^2$,8.2 万农村人口、6.4 万头大牲畜因旱发生饮水困难;其中,长岭县普遍遭受伏旱,绝收面积达到 160 km^2,经查,长岭站 2009 年 7—9 月的 SPEI 分别为-0.8、-1.8 和-1.6,其中 8、9 月达到重度干旱。由此可见, SPEI 能较好地反映东北地区干旱事件的时间、地点及强度。

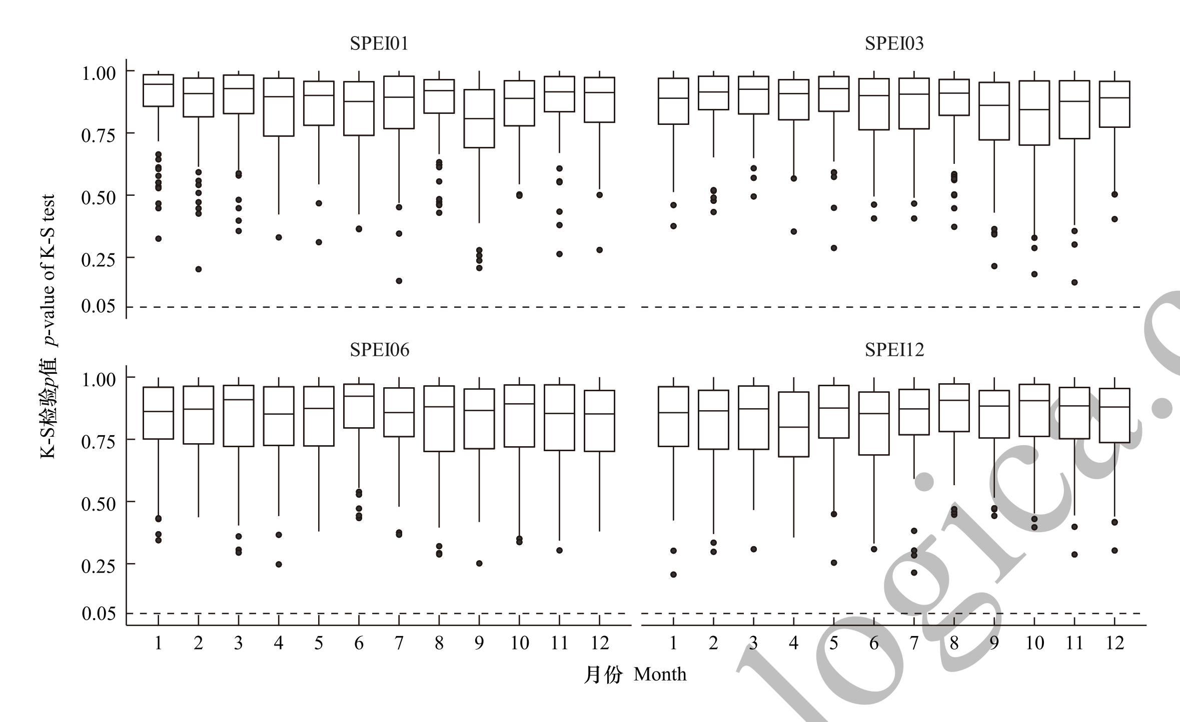


图 2　K-S 检验概率 p 值统计图(虚线为显著性水平 $\alpha=0.05$)

Fig.2　The p values of K-S Test for water surplus or deficit (dashed line was the significance level: $\alpha=0.05$)

SPEI:标准化降水蒸散指数 Standardized precipitation evapotranspiration index

表 1　典型干旱事件与同期 SPEI 核准(2004—2010 年)

Table 1　Verification of the Drought Events and SPEI in 2004—2010

持续时间 Duration	范围 Site	旱灾程度 Hazard intensity	SPEI
2004 年 3 月—6 月中旬	黑龙江西部 吉林西部 辽宁北部	重旱,部分特旱	昌图 5 月: -1.3; 富裕 6 月: -1.6; 白城 3—6 月: -1.4, -1.1, -0.7, -1.4;
2004 年 5 月下旬—7 月上旬	黑龙江西部	重旱	齐齐哈尔 6—7 月: -2, -1.1; 龙江 6—7 月: -1.9, -1.8;
2006 年 4 月—5 月	黑龙江中西部	中到重度干旱	齐齐哈尔 5 月: -1.3; 大庆 5 月: -1; 绥化 5 月: -1.2; 海伦 5 月: -1.7;
2007 年 6 月 11 日—8 月 10 日	三江平原	旱情严重	宝清 7 月: -1.2; 富锦 6—7 月: -1.1, -1.6; 佳木斯 6—7 月: -1.2, -2.2;
2008 年 1 月—3 月中旬	东北全境	1951 年以来降水最少	呼玛 1—2 月: -1.5, -1.33; 1 月东北平均: -0.62 2 月东北平均: -0.75
2008 年 9 月下旬—10 月下旬	黑龙江 辽宁	降水偏少 30%—90%	丹东 9—10 月: -1.6,-1.3; 桓仁 9—10 月: -2,-1; 齐齐哈尔 9 月: -1.2
2009 年 6 月下旬—11 月上旬	辽宁 吉林	1952 年以来最严重 夏秋连旱	四平 7—9 月: -1.3,-1.2,-1.5; 农安 7—9 月: -0.8,-1.5,-1; 长岭 7—9 月: -0.8,-1.8,-1.6; 开原 7—9 月: -1,-1.6,-1.8; 朝阳 7—9 月: -1.6,-1.7,-1.3; 义县 7—9 月:-1.4,-1.4, -1.6;

续表

持续时间 Duration	范围 Site	旱灾程度 Hazard intensity	SPEI
2010 年 9 月	吉林西部 黑龙江西南部	中到重度干旱	大庆 9 月：-1.3； 肇州 9 月：-1.4； 肇源 9 月：-1.8； 哈尔滨 9 月：-1.6； 乾安 9 月：-1.4； 通榆 9 月：-1.4； 大安 9 月：-1.8

SPEI：标准化降水蒸散指数 Standardized precipitation evapotranspiration index

3.3 干旱受灾面积对 SPEI 指数的验证分析

农作物受旱灾面积比例与生长季平均 SPEI 值的相关性分析结果显示，各省农作物受旱灾面积比例与 SPEI01、SPEI03、SPEI06 和 SPEI12 的相关系数在-0.52 与-0.76 之间，SPEI 指数与受旱灾面积呈极显著负相关关系（P<0.01），表明干旱越严重，SPEI 值越小，受旱灾面积越大。同时，研究发现，在相同的时间尺度下，受旱灾面积比例与 SPEI 的相关性在各个省份之间也存在差异，相关性最强的是辽宁省，其次是吉林省，黑龙江省相关性最弱。

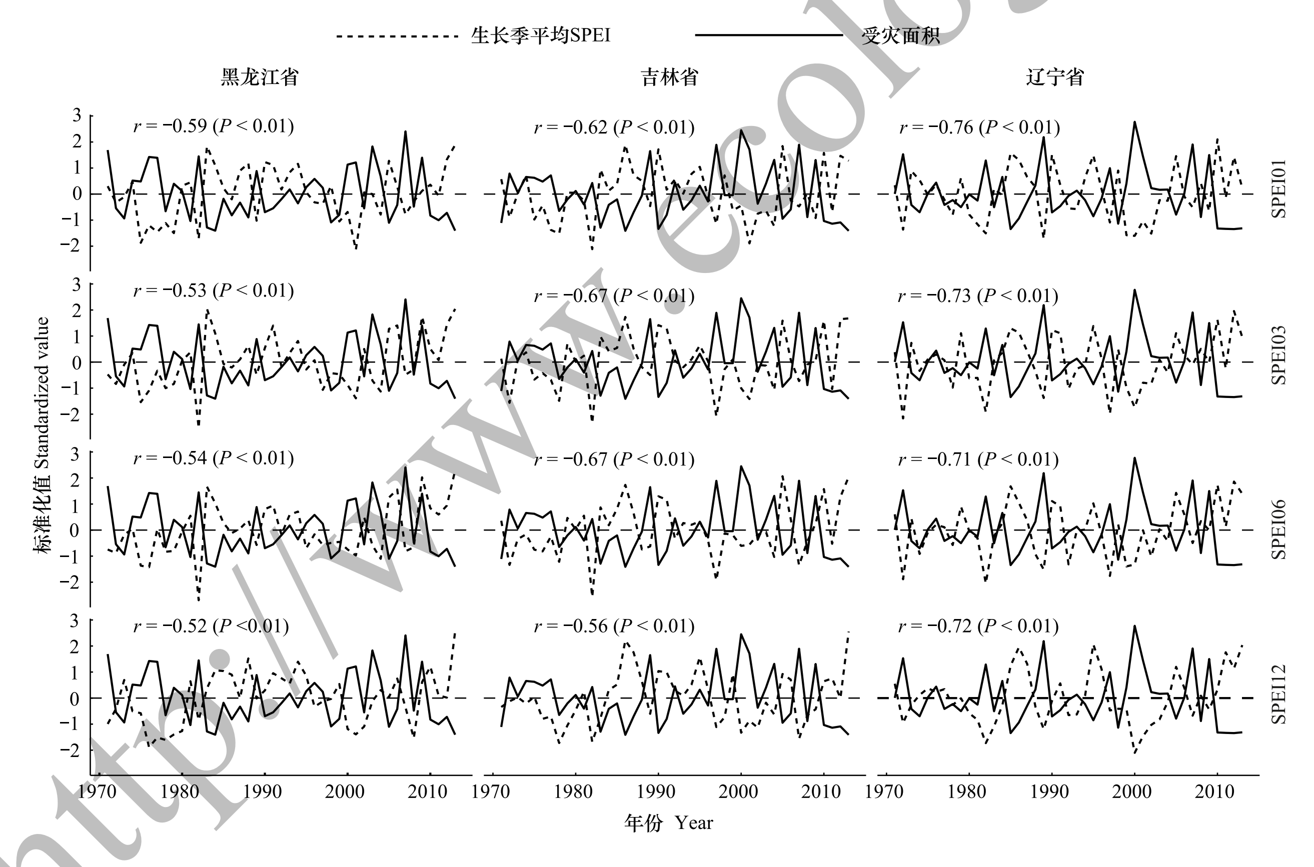


图 3 东北三省农作物受灾面积比例与生长季平均 SPEI 对比

Fig.3 The comparison between drought crop area ratio and the mean SPEI

3.4 土壤湿度对 SPEI 指数的验证分析

SPEI 指数与土壤湿度的相关性分析结果（图 4）表明，在 1、3、6 和 12 个月尺度下，51 个研究站点中分别有 46、47、46 和 45 个站点通过了相关系数的显著性检验（P<0.05），通过率分别达 90.2%、92.16%、90.2%和 88.24%；其中，分别有 46、45、44 和 40 个站点呈现极显著相关（P<0.01），通过率分别为 90.2%、88.24%、86.27 和 78.43%。同时，研究发现站点显著性检验的通过率随着 SPEI 时间尺度的增大而降低。通过了显著性检验

($P<0.05$)的所有研究站点,其土壤湿度与 SPEI 的相关系数取值范围为 0.26—0.74,平均值为 0.47,表明土壤湿度与 SPEI 呈显著正相关,SPEI 值越大,土壤湿度越大。

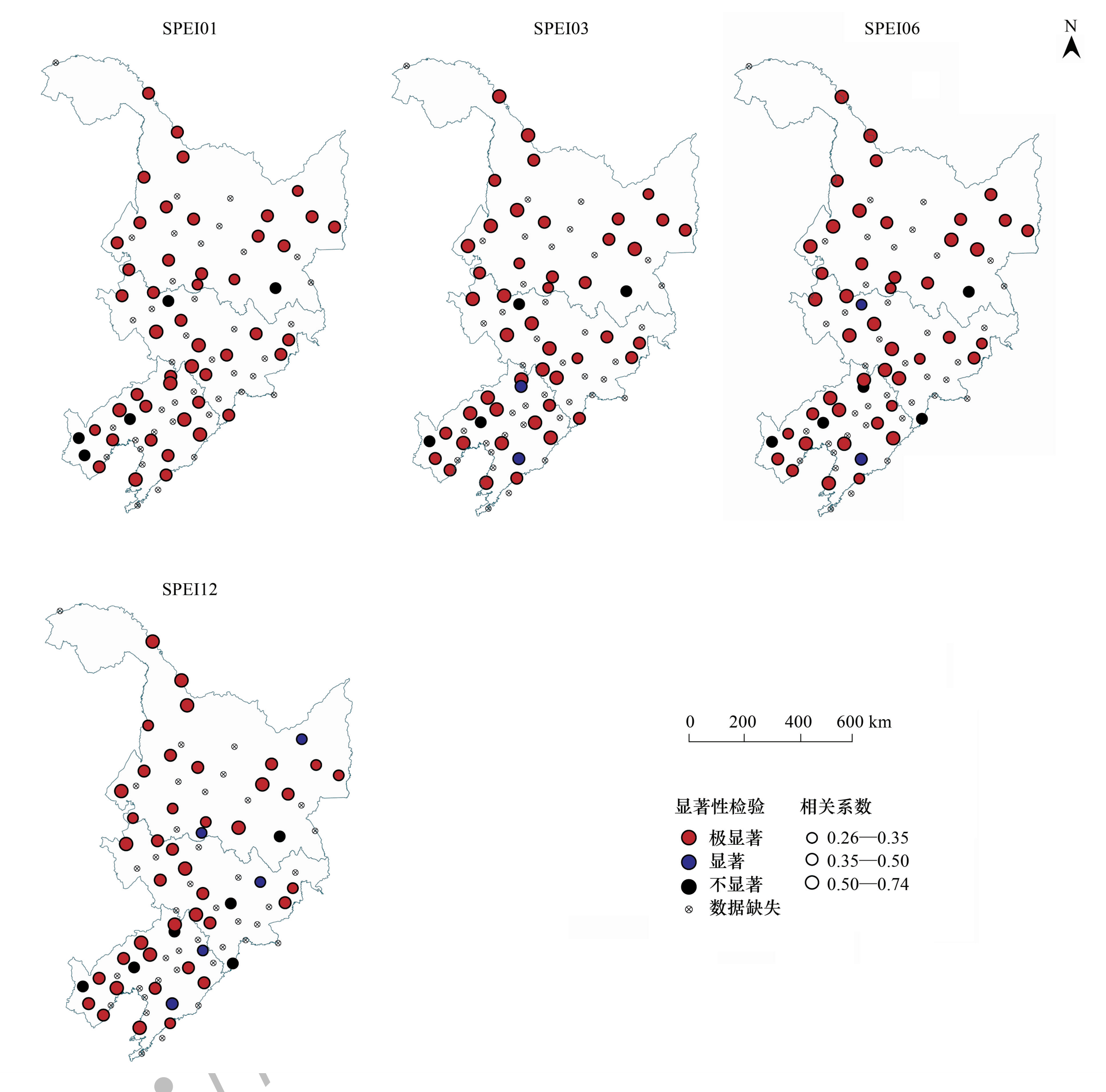


图 4　SPEI 与土壤湿度相关分析空间分布

Fig.4　Spatial distribution of correlation analysis of SPEI and soil moisture

4　讨论

(1) 根据 SPEI 指数的定义,SPEI 反映的是某月累积水分亏缺量在历史同期累积水分亏缺量序列中的分布概率,所以应当用 Log-logistic 分布对 1—12 月的累积水分亏缺量序列进行逐月地拟合;而 Vicente-Serrano[13]和庄少伟[14]在验证 SPEI 的适用性时,是对整个研究时期每年的水分亏缺量序列进行拟合检验,这种以年为时间尺度的验证方式掩盖了不同月份之间的水分亏缺量差异,偏离了 SPEI 的前提假设,据此得出的结论有待商榷。王林[15]验证了在 1 个月尺度下,东北地区 7 月份和 12 月份的水分亏缺量符合 Log-logistic 分布,其结果与本文相符,但未考虑前期降雨对干旱的影响及多时间尺度 SPEI 计算的重要性。为了确保 SPEI 指数能精确定量地区干旱,本文对东北地区各个站点的水分亏缺量序列进行逐月地拟合,并逐一进行 K-S 检验,证明了 SPEI 指数在东北地区具有较好的数学统计理论基础。

（2）SPEI 的理论适用性取决于所选的理论分布。Vicente-Serrano[13]提出 SPEI 指数时，对比了 Pearson Ⅲ、Lognormal、广义极值分布（generalized extreme value, GEV）和 Log-logistic 四种理论分布对水分亏缺量经验分布的拟合效果，最终认为 Log-logistic 更符合其研究站点的水分收支实际情况。王澄海[23]和王芝兰[24]对中国的降水量序列进行了 GEV 分布的拟合，并构建了 GEV 指数，虽然忽视了蒸散对干旱的影响，但为干旱指数的地区适用性研究开拓了新的视野，即应当根据研究区水分收支特点建立区域适用的分布模型，并据此构建干旱指数。此外，由于不同检验方法功效不同，所以还应选取合适的方法来检验水分亏缺量理论分布与经验分布的拟合优度，如 K-S, Anderson-Darling（A-D）和 Shapiro-Wilk（S-W）等[25]。综上，在验证干旱指数的区域适用性时，有必要对多种理论分布进行严格的拟合优度检验，确保研究结论在统计学上的合理性。本研究所使用的 Log-logistic 分布是干旱研究中较为常用的分布函数，并且已被证明其与东北地区水分亏缺量的拟合优度较好。然而，是否有拟合效果更优的理论分布？这也是干旱精确定量化研究的重要课题之一。

（3）在同一时间尺度下，东北三省受旱灾面积与 SPEI 指数的相关性从强到弱依次为：辽宁>吉林>黑龙江。出现这个结果的主要原因可能是受农业种植结构变化的影响。陈莉[26]认为水稻栽培多以水利灌溉为基础，受降水影响不大，因此在分析多年农作物干旱面积时，应排除水稻面积增加的影响，只考虑旱作农作物的播种面积。本文认为，水稻的生理抗旱性虽然低于其他作物，但由于灌溉条件成熟，水稻受干旱的影响比其他作物小，即同样的干旱强度下，其他作物比水稻更易受灾。也就是说，SPEI 指数对玉米、小麦等农作物受旱情况反映灵敏，而对水稻受旱情况反映不灵敏。由图 5 可见，1971—2013 年黑龙江省水稻面积由 $1.65\times10^3 km^2$ 扩大到 $3.18\times10^5 km^2$，占农作物总面积比例由 2% 上升到 26%，绝对面积和所占比例在 2008 年之后均远超吉林省和辽宁省。由此推断，黑龙江省水稻种植面积的剧增可能导致了该省农作物受旱灾面积与 SPEI 指数相关性的降低。

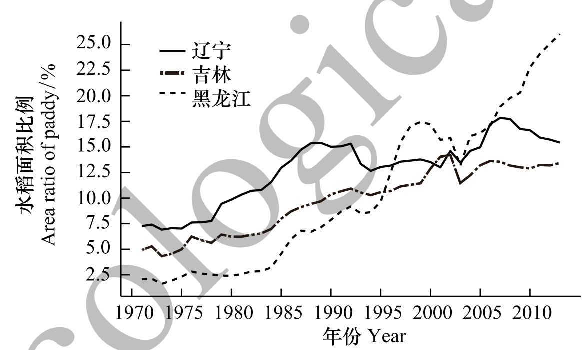


图 5 东北三省水稻种植面积比例变化

Fig.5 The variation of area ratio of paddy in the Northeast China

（4）由于土壤湿度数据缺失严重、采样频率过小且易受耕作方式影响等原因，各个站点土壤湿度与 SPEI 的相关系数相对偏小：在 $\alpha=0.05$ 的显著水平上（相关系数的临界值为 0.17），SPEI01、SPEI03、SPEI06 和 SPEI12 与土壤湿度的平均相关系数分别为 0.43、0.47、0.48 和 0.44，均不超过 0.5。该结果可以从赵静[27]的研究中得到部分佐证：锦州站 SPEI01 与土壤湿度的相关系数为 0.482，稍高于本研究的 0.468。土壤湿度和 SPEI 指数均是反映干湿状况的重要指标，本文使用的土壤湿度是旬值数据，每月采样 3 次，而 SPEI 指数则是依据逐日的气象数据转化为月尺度计算而来，其精细程度远超土壤湿度数据。因此，提高二者相关系数的关键在于增强土壤湿度数据的时间连续性和完整性，如提高采样频率、用插补法补全缺失数据等。

5 结论

干旱指数的区域适用性是地区干旱精确定量化的前提和基础。目前有关 SPEI 指数的区域适用性研究相对缺乏，但是通过我们统计检验以及相关性分析，验证了 SPEI 指数在东北地区干旱研究中的适用性。本文主要结论如下：

（1）东北地区 1、3、6 和 12 个月尺度的累积水分亏缺量序列均能被 Log-logistic 分布函数较好地拟合，基于该分布的 SPEI 指数在东北地区的应用具备数学统计理论基础。

（2）SPEI 指数与典型干旱事件的吻合度较高，能较为准确地反映干旱事件的时间、地点和强度，是干旱监测和预警的重要手段。

（3）SPEI 指数与干旱灾情数据呈显著负相关。干旱越严重，SPEI 指数越小，农作物受旱灾面积越大。

(4)SPEI 指数与土壤水分资料呈显著正相关。SPEI 指数能指示土壤水分状况,SPEI 指数越大,土壤湿度越大。

综上所述,SPEI 指数的理论假设符合东北实际情况,并且能被历史资料和事实所验证,说明 SPEI 指数在东北干旱研究中的适用性较好。

参考文献(References):

[1] 卫捷, 马柱国. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较. 地理学报, 2003, 58(S1): 117-124.

[2] Dai A G. Drought under global warming: a review. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 45-65.

[3] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. Comment on "Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900—2008" by Aiguo Dai. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D19): 1-9.

[4] 魏凤英, 张婷. 东北地区干旱强度频率分布特征及其环流背景. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 1-7.

[5] 谢安, 孙永罡, 白人海. 中国东北近 50 年干旱发展及对全球气候变暖的响应. 地理学报, 2003, 58(S1): 75-82.

[6] 苏宏新, 李广起. 基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系. 生态学报, 2012, 32(17): 5467-5475.

[7] 王文, 李亮, 蔡晓军. CI 指数及 SPEI 指数在长江中下游地区的适用性分析. 热带气象学报, 2015, 31(3): 403-416.

[8] 熊光洁, 王式功, 李崇银, 尚可政, 马玉霞, 庄少伟. 三种干旱指数对西南地区适用性分析. 高原气象, 2014, 33(3): 686-697.

[9] 张玉静, 王春乙, 张继权. 基于 SPEI 指数的华北冬麦区干旱时空分布特征分析. 生态学报, 2015, 35(21): 7097-7107.

[10] Chen H P, Sun J Q. Changes in Drought Characteristics Over China Using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Climate, 2015, 28(13): 5430-5447.

[11] 张岳军, 郝智文, 王雁, 李明明, 陈二萍, 李芬, 张永瑞. 基于 SPEI 和 SPI 指数的太原多尺度干旱特征与气候指数的关系. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1418-1424.

[12] 王劲松, 李耀辉, 王润元, 冯建英, 赵艳霞. 我国气象干旱研究进展评述. 干旱气象, 2012, 30(4): 497-508.

[13] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.

[14] 庄少伟, 左洪超, 任鹏程, 熊光洁, 李邦东, 董文成, 王利盈. 标准化降水蒸发指数在中国区域的应用. 气候与环境研究, 2013, 18(5): 617-625.

[15] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析. 高原气象, 2014, 33(2): 423-431.

[16] 孙力, 沈柏竹, 安刚. 中国东北地区地表干湿状况的变化及趋势分析. 应用气象学报, 2003, 14(5): 542-552.

[17] Zheng H F, Shen G Q, He X Y, Yu X Y, Ren Z B, Zhang D. Spatial assessment of vegetation vulnerability to accumulated drought in Northeast China. Regional Environmental Change, 2015, 15(8): 1639-1650.

[18] Chen Z J, He X Y, Cook E R, He H S, Chen W, Sun Y, Cui M X. Detecting dryness and wetness signals from tree-rings in Shenyang, Northeast China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 302(3): 301-310.

[19] Yu X Y, He X Y, Zheng H F, Guo R C, Ren Z B, Zhang D, Lin J X. Spatial and temporal analysis of drought risk during the crop-growing season over northeast China. Natural Hazards, 2014, 71(1): 275-289.

[20] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO,1998:24-25.

[21] 王春林, 郭晶, 薛丽芳, 丁丽佳. 改进的综合气象干旱指数 CI_{new} 及其适用性分析. 中国农业气象, 2011, 32(4): 621-626, 631-631.

[22] Massey F J Jr. The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit. Journal of the American Statistical Association, 1951, 46(253): 68-78.

[23] 王澄海, 王芝兰, 郭毅鹏. GEV 干旱指数及其在气象干旱预测和监测中的应用和检验. 地球科学进展, 2012, 27(9): 957-968.

[24] 王芝兰, 王劲松, 李耀辉, 王澄海. 标准化降水指数与广义极值分布干旱指数在西北地区应用的对比分析. 高原气象, 2013, 32(3): 839-847.

[25] Stagge J H, Tallaksen L M, Gudmundsson L, Van Loon A F, Stahl K. Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). International Journal of Climatology, 2015, 35(13): 4027-4040.

[26] 陈莉, 方丽娟, 李帅. 东北地区近 50 年农作物生长季干旱趋势研究. 灾害学, 2010, 25(4): 5-10.

[27] 赵静, 严登华, 杨志勇, 胡勇, 翁白莎, 宫博亚. 标准化降水蒸发指数的改进与适用性评价. 物理学报, 2015, 64(4): 049202-1: 049202-9.